第 40 卷 第 2 期
2023 年 4 月

应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 40 No. 2
Apr. 2023

文章编号:1000-4939(2023)02-0474-07

基于统计参数映射分析不同习惯落地模式跑者跑步过程中地面反力的差异

魏震,王琳

(上海体育学院运动科学学院,200438 上海)

摘 要:比较不同足落地模式跑者地面反力(ground reaction force,GRF)特征值是否存在差异,并基于一维统计参数映射(statistical parametric mapping,SPM)探索不同足落地模式跑者足触地期间GRF-时间连续性数据的差异。研究纳入 32 名习惯后足落地跑者(rearfoot strike,RFS)和 27 名习惯非后足落地跑者(non-rearfoot strike,NRFS),跑者以 12 km/h 的速度在构建的橡胶跑道上进行跑步,Kistler 测力台被用于采集跑步过程中 GRF 的数据。采用 SPM 分析不同足落地模式跑者足触地期间三维方向 GRF-时间连续性数据的差异。GRF 特征值方面,RFS 跑者的垂直平均负荷率和触地时前-后方向 GRF 均显著大于 NRFS 跑者。SPM 结果发现,相较于 NRFS 跑者,RFS 跑者的 GRF 曲线在站立相前-后方向的 5% ~10% 显著较大,内-外方向的 4% ~12% 显著较小,垂直方向的 0 ~3% 显著较小,8% ~14% 显著较大。对比 GRF 特征值和 SPM 分析结果,发现通过特征值分析不足以代表足触地期间 GRF-时间连续性数据的变化,应建立连续性假设检验了解跑步过程中的生物力学变化,进而更好为跑步损伤预防提供一定的指导。

关键词:统计参数映射;一维数据;地面反力;跑步爱好者;足落地模式

中图分类号:G804.2 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.02.025

Ground reaction forces characteristics among runners with different foot strike patterns: Analysis of one-dimensional statistical parametric mapping

WEI Zhen,WANG Lin

(School of Kinesiology,Shanghai University of Sport,200438 Shanghai,China)

Abstract: To explore ground reaction forces (GRF) characteristic values among runners with different foot strike patterns (FSP), and then analyze GRF-time series data based on one-dimensional statistical parametric mapping (SPM), 32 habitual rearfoot strike pattern (RFS) runners and 27 habitual non-rearfoot strike pattern (NRFS) runners were included in our study. Kistler force plates were used to collect GRF data when participants were running on rubber at a speed of 12 km/h. SPM was used to analyze the differ-

收稿日期:2022-05-15 修回日期:2022-06-03
基金项目:国家自然科学基金资助项目(11572202)
通信作者:王琳,教授。E-mail:wanglin@sus.edu.cn
引用格式:魏震,王琳. 基于统计参数映射分析不同习惯落地模式跑者跑步过程中地面反力的差异[J]. 应用力学学报,2023,40(2):474-480.
WEI Zhen,WANG Lin. Ground reaction forces characteristic among runners with different foot strike patterns: Analysis of one-dimensional statistical parametric mapping[J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(2):474-480.

ences of GRF-time series data among runners with different FSP. GRF characteristic values demonstrated that vertical average loading rate and anterior-posterior GRF of RFS runners were significantly higher than those of NRFS runners. The SPM results found that compared with NRFS runners, RFS runners have significantly higher GRF during 5%-10% and lower GRF during 4%-12% of the stance phase in anterior-posterior and medial-lateral direction. RFS runners have significantly lower GRF during 0-3% and higher GRF during 8%-14% of the stance phase in vertical direction. The results of GRF characteristic values and SPM GRF-time series data suggested that traditional characteristic values analysis seems insufficient to represent actual biomechanical characteristics of lower limbs, continuity hypothesis test like SPM should be established to better describe biomechanical parameters-times series data, thus providing constructive suggestions for the prevention of running injuries.

Key words: statistical parametric mapping (SPM); one-dimensional data; ground reaction force (GRF); runner; foot strike pattern

近年来跑步落地模式对人体下肢生物力学的影响成为跑步研究领域的热点问题。大量研究通过足触地期间相关生物力学参数-时间序列曲线去观察不同足落地模式跑步站立相期间下肢运动学、动力学、肌肉激活、足底压力等指标的趋势变化[1-4]，并通过触地期间关节活动度、最大力矩、峰值冲击力和压强等数据的特征值，比较不同足落地模式触地期间的运动生物力学差异[2]。但是跑步站立相期间生物力学参数-时间序列为连续性数据，常见对特征值分析的假设检验在数据处理过程中会产生随机误差[5-6]，且不同受试者数据的平均会导致数据的有序性，个体间变异性等相关重要信息丢失，使得研究结果出现偏倚[1,7-8]。因此，为了较好比较连续性数据之间的统计差异，应建立连续性数据模型去检验不同足落地模式足触地期期间生物力学指标之间的差异[5]。

统计参数映射(statistical parametric mapping, SPM)，其原理是基于随机场理论进行拓扑分析[9-11]，将时空平滑及标准化后数据进行检验，通过计算连续性数据集超过阈值的部分，进而计算得出数据之间的统计学差异，因此能够较好克服数据提取的偏倚。相似于传统统计方法，SPM 首先通过残差值检验数据的分布类型，然后根据数据类型分为参数映射和非参数映射两种，其主要包括统计方法包括单样本和两样本检验、方差分析、多样本检验、事后检验和随机效应模型分析等，目前已经被广泛用于运动生物力学研究领域[7-8,12-13]。

已有对不同足落地模式跑者足触地期间地面反作用力(ground reaction force, GRF)的研究发现，相较于前足落地(forefoot strike, FFS)跑者，后足落地(rearfoot strike, RFS)跑者站立相的前 50 ms 内有一个额外的峰值即瞬态冲击[14]，且负荷率显著较高，因此部分研究认为其可能是 RFS 跑步损伤的风险因素，进而推荐跑者使用非后足落地跑者(non-rearfoot strike, NRFS)进行跑步[15-16]。但已有对不同足落地模式的研究多通过特征值进行比较，如垂直平均负荷率、垂直瞬间负荷率[17]、垂直地面反力[15,18]，峰值压强和接触面积[1-3]等。虽然通过特征值能间接反应跑步时下肢的运动生物力特点，但是跑步足触地期间 GRF 为连续性时间序列，特征值分析尚不能完全代表跑步过程中的生物力学特点。因此本研究目的为比较不同足落地模式足触地期间一维特征值是否存在差异，并基于 SPM 探索足触地期间不同足落地模式跑者三维地面反力-时间连续性变量之间的差异。

1　研究方法

1.1　研究对象

本研究共纳入 32 名习惯 RFS 跑者，年龄(24.6 ±3.5)岁；身高(172.2 ±5.8) cm；体质量(69.9 ±10.0) kg；BMI(23.5 ±2.5) kg/m²；每周跑步里程(16.9 ±14.6) km)。27 名习惯 NRFS 跑者，其中年龄(27.4 ±6.6)岁；身高(174.5 ±3.8) cm；体质量(67.5 ±11.1) kg；BMI(22.1 ±3.2) kg/m²；每周跑步里程(32.5 ±27.3) km[1-2]。所有受试者在过去半年内无下肢损伤史，无肌肉骨骼疾病。本研究通过上海体育学院伦理委员会批准(102772021RT130)，所有受试者均签订知情同意书。

1.2　测试流程

测试开始前，受试者换上统一跑鞋(ASICS, Ja-

pan)在跑步机上以自我舒适速度热身 5 min。使用 Kistler 测力台(Kistler Instruments Corp. Switzerland)采集跑步过程中三维的地面反力,采样频率为 1 000 Hz。使用两对 Witty 无线定时器(Witty,Microgate,Italy)采集测试区域 3 m 米间隔的平均速度,跑步速度控制在 12 km/h ±5% 范围内[2]。

测试时,受试者先进行静态校准,然后在室内长 15 m、宽 1 m、厚 2 cm 的橡胶跑道上,以习惯的足落地模式进行跑步。数据成功的标准为受试者以习惯足落地模式,以正常跑步姿势跑过测试区域,右足在踏上测力台的同时,跑步速度在测试要求速度之内,研究共采集 3 条成功的步态,用作后续数据的分析和统计。

1.3 数据处理

本研究以 20 N 为临界值,截取跑者跑步过程中右足接触地面的站立相。使 Butterworth 的四阶低通滤波对数据进行过滤,使用 Vicon Nexus 2.6 导出测试数据并通过 Origin 9.0 软件将数据标准化至 101 个数据点,其中 GRF 将根据受试者体重进行标准化。对于足落地模式,将结合 GRF 曲线特征进行判断。鉴于对中长距离跑者研究发现,足落地模式的比例分别为 RFS 跑者 (75%)、中足触地 (23%) 和前足触地(2%)[19],本研究将中足和前足落地模式统称为 NRFS 进行研究。

1.4 统计学分析

对于触地期间 GRF 特征值将使用 Kolmogorov-Smirnov 进行正态性检验,采用独立样本 T 检验比较不同足落地模式跑者 GRF 特征值之间的差异,95% 置信区间和 Cohen's d 效应量将用于量化差异的大小,所有数据在 SPSS 22.0 (IBM,Armonk,NY)进行统计分析,以均值 ± 标准差表示。对于三维方向 GRF 数据,首先通过残差值进行正态性检验后,然后根据以下公式[5,7],使用 SPM MATLAB R2021a (MathWorks 公司,美国)中独立样本 T 检验对数据进行分析。

$$M(t)=\frac{\bar{y}_1(t)-\bar{y}_2(t)}{\sqrt{\frac{1}{n_1}V_{ar}[y_1(t)]+\frac{1}{n_2}V_{ar}[y_2(t)]}} \tag{1}$$

$$P(T(t)_{max}>t_{crit})=1-\exp\left(-\int_{t_{crit}}^{\infty}f_{pdf}(x)\mathrm{d}x-E_D\right)=\alpha \tag{2}$$

式(1)中,探索 RFS 和 NRFS 两组变量 GRF 连续性数据的变化,其中:y_1 和 y_2 分别表示 RFS 和 NRFS 两组变量;$\bar{y}_1(t)$ 与 $\bar{y}_2(t)$ 表示其对应点的均值;n_1 和 n_2 表示对应组的样本数;$V_{ar}(x_1)$ 和 $V_{ar}(x_2)$ 表示对应组变量的方差。式(2)中,基于随机场理论计算两组数据的差异[10],其中:$T(t)$ 表示两组变量的差异,$T(t)_{max}$ 为两组变量差异的最大值;t_{crit} 是 $M(t)$ 统计差异的阈值;$f_{pdf}(x)$ 是 T 检验统计的概率密度函数;E_D 是与平滑相关的欧拉密度函数,当 $T(t)_{max}$ 大于 $M(t)$ 统计的阈值 t_{crit} 时,数据具有统计学意义($\alpha=0.05$)。

2 研究结果

2.1 触地后 GRF 特征值的比较

研究结果显示,不同足落地模式跑者在足触地期间,RFS 跑者的垂直平均负荷率显著大于 NRFS 跑者。对于足触地瞬间三维方向 GRF,研究发现 RFS 跑者的 GRF 在前后方向显著大于 NRFS 跑者,方向均为后方,两种足落地模式的 GRF 在内外侧方向和垂直方向无显著差异。在冲击峰值方面,GRF 研究结果显示两种足落地模式在前后、内外和垂直方向均无显著差异,见表 1。

表 1 触地期间不同足落地模式跑者 GRF 特征值的比较

Tab. 1 Comparison of GRF characteristic values of runners with different foot strike patterns during the stance phase

	RFS	NRFS	P	ES	95% CI	
垂直平均负荷率	167.58 ± 55.07	97.78 ± 18.49	< 0.001*	1.70	47.56	92.03
触地瞬间-前后(GRF/BW)	−0.020 ± 0.011	−0.012 ± 0.010	0.008*	−0.76	−0.013	−0.002
触地瞬间-内外(GRF/BW)	0.003 ± 0.003	0.002 ± 0.005	0.410	0.24	−0.001	0.003
触地瞬间-垂直(GRF/BW)	0.036 ± 0.007	0.039 ± 0.007	0.060	−0.43	−0.007	0.000
冲击峰值-前后(GRF/BW)	0.365 ± 0.065	0.372 ± 0.065	0.635	−0.11	−0.041	0.025
冲击峰值-内外(GRF/BW)	0.092 ± 0.032	0.097 ± 0.033	0.557	−0.15	−0.022	0.012
冲击峰值-垂直(GRF/BW)	2.697 ± 0.287	2.762 ± 0.274	0.379	−0.23	−0.212	0.082

注:BW 表示体质量;RFS 表示习惯后足跑步者;NRFS 表示习惯非后足跑步者;* 表示 $P<0.05$;ES 表示效应量;CI 表示置信区间。

2.2　触地阶段 SPM 对 GRF 的比较

使用 SPM 进行独立样本 T 检验结果显示，在前后方向站立相的 5% ～10% 显著超过阈值（$P=0.01$，$t_{crit}=3.19$），RFS 跑者的 GRF 显著大于 NRFS 跑者，其方向均向后侧。

在内外侧方向 GRF 结果显示，在站立相的 4% ～12% 显著超过阈值（$P=0.004$，$t_{crit}=3.16$），NRFS 跑者的 GRF 显著大于 RFS 跑者，且 NRFS 跑者 GRF 方向一直向内侧，RFS 跑者在 4% ～9% 向内侧，9% ～12% 为向外侧。

垂直方向 GRF 结果显示，在站立相的 0～3% 显著超过阈值（$P=0.03$，$t_{crit}=3.22$），NRFS 跑者的 GRF 显著大于 RFS 跑者，方向向上。在站立相的 8% ～14% 显著超过阈值（$P=0.03$，$t_{crit}=3.22$），RFS 跑者的 GRF 显著大于 NRFS 跑者，方向向上，见图 1～2。

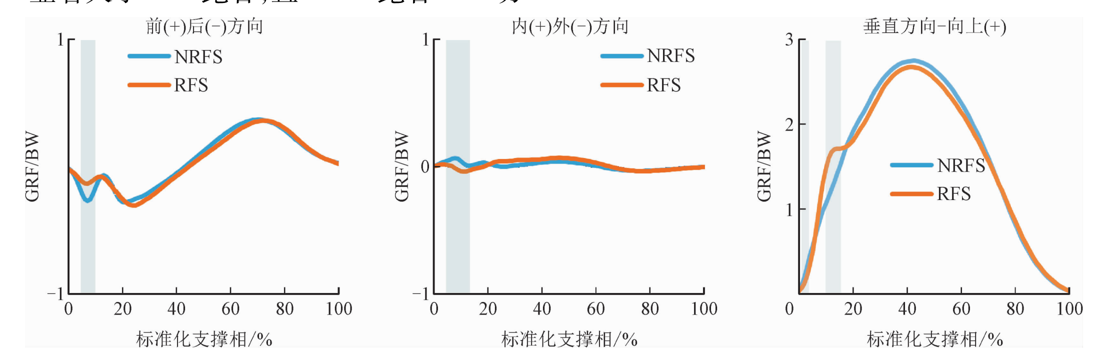


图 1　触地期间不同足落地模式跑者三维方向 GRF 的比较

Fig. 1　Comparison of three-dimension direction GRF of runners with different foot strike patterns during the stance phase

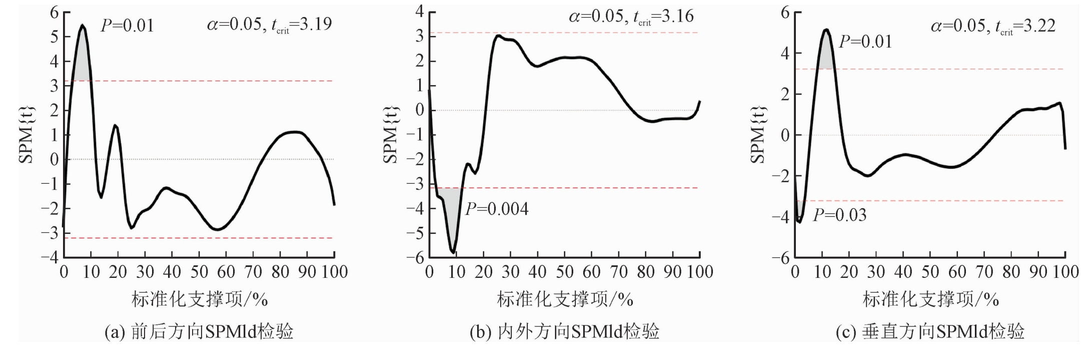


图 2　触地期间不同足落地模式跑者三维方向 GRF 的 SPM 比较

Fig. 2　SPM comparison of three-dimensional GRF of runners with different landing patterns during the stance phase

3　讨　论

本研究主要比较不同足落地模式跑者 GRF 特征值是否存在差异，并基于 SPM 探索不同足落地模式跑者足触地期间三维方向 GRF-时间连续性数据的差异。

特征值结果发现不同足落地模式跑者足触地期间，RFS 跑者的垂直平均负荷率和触地瞬间向后的 GRF 均显著大于 NRFS 跑者。SPM 结果发现，相较于 NRFS 跑者，RFS 跑者的 GRF 曲线在站立相前-后方向的 5% ～10% 显著较大，内-外方向的4% ～12% 显著较小，垂直方向的 0～3% 显著较小，8% ～14% 显著较大。

3.1　触地瞬间 GRF 特征值比较

对于足触地时的垂直平均负荷率，不同足落地模式的计算方法不同，RFS 跑者多通过垂直方向的 GRF-时间曲线起点与第一个峰值时间 20% ～80% 的斜率计算，而 NRFS 跑者计算曲线起点到 13% 的斜率[7,17]。基于已有计算垂直平均负荷率的方式，本研究结果与 NORDIN 等研究相同[17,20-21]，研究发现 RFS 跑者在足触地时垂直平均负荷率显著大于 NRFS 跑者，但使用 SPM 对 GRF-时间数据统计结果却并不支持此结论，研究发现垂直方向 GRF 在站立相足触地时间的 0～3%，NRFS 跑者的垂直平均负

荷率大于 RFS 跑者，在 8% ~14% RFS 跑者的垂直平均负荷率大于 NRFS 跑者。因此，尽管有研究从垂直平均负荷率角度提出 NRFS 跑者优于 RFS 跑者，跑步损伤风险相对较小[22-23]，甚至建议习惯 RFS 跑者通过步态再训练转变足落地模式，但本研究结果尚不支持此结论。此外，本研究结果也间接证明生物力学领域一维随时间变化的连续性数据集，特征值统计检验有一定的局限，应建立连续性数据模型检验，更好的分析数据之间的差异。

对于 GRF，本研究发现垂直方向的 GRF 大于前后方向大于内外方向，触地瞬间和三维方向 GRF 峰值特征值方面仅发现 RFS 跑者在足触地瞬间向后方的 GRF 显著大于 NRFS 跑者。本研究结果与 BOYER 等[22]研究结果相同，其研究认为 RFS 跑者足触地时压力中心相较于 NRFS 更向后，足触地时 NRFS 跑者的趾屈肌会收缩吸收较大的冲击能量，RFS 跑者足跟触地，无直接的足部结构缓冲冲击力，因此向后方向的 GRF 显著较大。对于内外和垂直方向 GRF 特征值值，虽然有研究提出其可能与跑步运动损伤相关[24-26]，但本研究不同足落地模式跑者之间未发现显著性差异，未来研究应在此方面进一步探讨。

3.2 触地阶段 SPM 对 GRF 的比较

通过 SPM 对不同足落地模式跑者站立相 GRF 进行独立样本 T 检验，在前后方向研究结果发现在跑者支撑早期站立相的5% ~10% 范围内，RFS 跑者的 GRF 均显著大于 NRFS 跑者，且方向均向后侧。对于前后方向的 GRF，NAPIER 等研究认为较大向后方的 GRF（也称制动力）对于跑步步幅和身体减速有较大影响，而且向后方较大的力率与胫骨加速度有关[25,27]。结合已有对跑步时下肢生物力学分析的研究[28]，研究认为相较于 NRFS，在跑步支撑早期 RFS 跑者向后的 GRF 较大，其在降低身体速度的同时，使得胫骨加速度也较大，其可能与跑步常见的“跑步膝”有关。

在内-外侧方向，SPM 结果发现在站立相的 4% ~12% 显著超过阈值，NRFS 跑者的 GRF 显著大于 RFS 跑者，且 NRFS 跑者 GRF 方向一直向内侧，RFS 跑者在 4% ~9% 向内侧，9% ~12% 侧为向外侧。虽然内-外侧方向的 GRF 值小于前后和垂直方向，然而其方向与跑步运动方向垂直，且骨对剪切力的承受程度要显著小于压缩力，因此其对跑步下肢力学产生较大影响。BOYER 等研究发现在站立相 0 ~10% 期间 FFS 跑者向内和向后 GRF 的分量是使 GRF 合力更平行与地面，其损伤风险相对更小[22,29]。但由于 NRFS 跑者向内的剪切力显著较大[30]，RFS 跑者剪切力方向会由内向外发生变化，因此其与跑步损伤相关机制有待于进一步证实。

垂直方向上的 GRF 被认为与跑步相关损伤有较为直接的关系[15,31]。已有研究也从 GRF 曲线发现 RFS 比 NRFS 多一个冲击峰值，认为额外的冲击峰值可能使得 RFS 跑者跑步损伤的风险增大，尤其对于女性跑者[32]，因此研究建议通过步态再训练转变为 NRFS 进行跑步[24,33-35]。与已有研究不同，通过 SPM 分析不同足落地模式跑者 GRF 发现，尽管在站立相的 8% ~14% 显著超过阈值，RFS 跑者的 GRF 显著大于 NRFS 跑者，但与此同时站立相的 0 ~3% NRFS 跑者的 GRF 显著大于 RFS 跑者。鉴于已有对不同足落地模式跑步 GRF 的研究多通过特征值，并未发现对垂直 GRF-时间序列数据进行 SPM 分析，因此垂直方向 GRF 的差异对跑步损伤的影响尚不能得出一致性结论。

本研究存在一定的局限性，在受试者方面本研究仅纳入男性跑步爱好者，因此研究结果尚不能代表女性跑者 GRF 的变化。在研究设计方面，本研究将前足和中足落地模式跑者合并为 NRFS 进行研究，可能会导致研究结果出现一定偏倚，未来研究可将足落地模式更细致的分类后，结合下肢髋、膝和踝关节运动学和动力学参数进一步探讨。

4 结 论

本研究通过 SPM 分析不同足落地模式足触地期间三维方向 GRF-时间连续性数据的差异，不同于常见特征值研究结果，两种足落地模式在三维方向 GRF 均存在显著差异。因此，研究认为通过特征值分析不同足落地模式跑步时 GRF 变化虽有一定合理性，但不足以描述站立相期间一维生物力学参数-时间序列的变化，应建立连续性假设检验更好分析跑步过程中的生物力学特征，进而为跑步损伤预防提供一定的指导。

参考文献：

[1] WEI Z, LI J X, FU W J, et al. Plantar load characteristics among runners with different strike patterns during preferred speed[J]. Journal of exercise science & fitness, 2020, 18(2): 89-93.

[2] WEI Z, ZHANG Z W, JIANG J Y, et al. Comparison of plantar loads among runners with different strike patterns[J]. Journal of sports sciences, 2019, 37(18): 2152-2158.

[3] 魏震, 李静先, 王琳. 不同足落地模式跑者在不同路面跑步时足底压力特征[J]. 中国运动医学杂志, 2021, 40(5): 344-351.
WEI Zhen, LI Jingxian, WANG Lin. Plantar load characteristics among runners with different strike patterns and running on different surfaces[J]. Chinese journal of sports medicine, 2021, 40(5): 344-351(in Chinese).

[4] SENELI R M, BESCHORNER K E, O'CONNOR K M, et al. Foot joint coupling variability differences between habitual rearfoot and forefoot runners prior to and following an exhaustive run[J]. Journal of electromyography and kinesiology, 2021, 57: 102514.

[5] PATAKY T C, VANRENTERGHEM J, ROBINSON M A. Zero- vs. one-dimensional, parametric vs. non-parametric, and confidence interval vs. hypothesis testing procedures in one-dimensional biomechanical trajectory analysis[J]. Journal of biomechanics, 2015, 48(7): 1277-1285.

[6] PATAKY T C, VANRENTERGHEM J, ROBINSON M A. The probability of false positives in zero-dimensional analyses of one-dimensional kinematic, force and EMG trajectories[J]. Journal of biomechanics, 2016, 49(9): 1468-1476.

[7] WARMENHOVEN J, HARRISON A, ROBINSON M A, et al. A force profile analysis comparison between functional data analysis, statistical parametric mapping and statistical non-parametric mapping in on-water single sculling[J]. Journal of science and medicine in sport, 2018, 21(10): 1100-1105.

[8] 张马森, 周兴龙, 刘卉. 基于统计参数映射分析跑鞋跟掌落差对下肢关节负荷的影响[J]. 医用生物力学, 2022, 37(6): 1158-1164.
ZHANG Masen, ZHOU Xinglong, LIU Hui. Effects of heel-to-toe drop of running shoes on lower limb joint loading based on statistical parameter mapping[J]. Journal of medical biomechanics, 2022, 37(6): 1158-1164.

[9] BRETT M, PENNY W, KIEBEL S. An introduction to random field theory[J]. Human brain function, 2010(3): 1-15.

[10] ADLER R J, TAYLOR J E. Random fields and geometry[M]. New York: Springer, 2007.

[11] PATAKY T C. Generalized *n*-dimensional biomechanical field analysis using statistical parametric mapping[J]. Journal of biomechanics, 2010, 43(10): 1976-1982.

[12] ROBINSON M A, VANRENTERGHEM J, PATAKY T C. Statistical parametric mapping (SPM) for alpha-based statistical analyses of multi-muscle EMG time-series[J]. Journal of electromyography and kinesiology, 2015, 25(1): 14-19.

[13] 梅齐昌, 相亮亮, 李建设, 等. 基于一维统计参数映射分析跑者跑步地面反作用力差异[J]. 医用生物力学, 2021, 36(5): 684-691.
MEI Qichang, XIANG Liangliang, LI Jianshe, et al. Analysis of ground reaction forces during running based on one-dimensional statistical parametric mapping[J]. Journal of medical biomechanics, 2021, 36(5): 684-691(in Chinese).

[14] 姜嘉怿, 王琳. 跑步落地模式对运动损伤及下肢运动生物力学的影响研究进展[J]. 中国运动医学杂志, 2018, 37(9): 801-806.
JIANG Jiayi, WANG Lin. Progress in research on sports injuries and lower extremity biomechanics among runners with different foot strike pattern[J]. Chinese journal of sports medicine, 2018, 37(9): 801-806(in Chinese).

[15] LIEBERMAN D E, VENKADESAN M, WERBEL W A, et al. Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners[J]. Nature, 2010, 463(7280): 531-535.

[16] ANDERSON L M, BONANNO D R, HART H F, et al. What are the benefits and risks associated with changing foot strike pattern during running? A systematic review and meta-analysis of injury, running economy, and biomechanics[J]. Sports medicine, 2020, 50(5): 885-917.

[17] YIN L L, HU X Y, LAI Z Q, et al. Leg stiffness and vertical stiffness of habitual forefoot and rearfoot strikers during running[J]. Applied bionics and biomechanics, 2020, 2020: 8866340.

[18] LI J L, SONG Y, XUAN R R, et al. Effect of long-distance running on inter-segment foot kinematics and ground reaction forces: a preliminary study[J]. Frontiers in bioengineering and biotechnology, 2022, 10: 833774.

[19] HASEGAWA H, YAMAUCHI T, KRAEMER W J. Foot strike patterns of runners at the 15-km point during an elite-level half marathon[J]. Journal of strength and conditioning research, 2007, 21(3): 888-893.

[20] MERCER J A, HORSCH S. Heel-toe running: A new look at the influence of foot strike pattern on impact force[J]. Journal of exercise science & fitness, 2015, 13(1): 29-34.

[21] NORDIN A D, DUFEK J S, MERCER J A. Three-dimensional impact kinetics with foot-strike manipulations during running[J]. Journal of sport and health science, 2017, 6(4): 489-497.

[22] BOYER E R, ROONEY B D, DERRICK T R. Rearfoot and midfoot or forefoot impacts in habitually shod runners[J]. Medicine & science in sports & exercise, 2014, 46(7): 1384-1391.

[23] SHIH Y O, TENG H L, POWERS C M. Lower extremity stiffness predicts ground reaction force loading rate in heel strike runners[J]. Medicine & science in sports & exercise, 2019, 51(8): 1692-1697.

[24] JOHNSON C D, OUTERLEYS J, DAVIS I S. Relationships between tibial acceleration and ground reaction force measures in the medial-lateral and anterior-posterior planes[J]. Journal of biomechanics, 2021, 117: 110250.

[25] NAPIER C, MACLEAN C L, MAURER J, et al. Kinetic risk factors of running-related injuries in female recreational runners[J]. Scandinavian journal of medicine & science in sports, 2018, 28(10): 2164-2172.

[26] PHAN X, GRISBROOK T L, WERNLI K, et al. Running quietly reduces ground reaction force and vertical loading rate and alters foot strike technique[J]. Journal of sports sciences, 2017, 35(16): 1636-1642.

[27] SAKATA H, HASHIZUME S, AMMA R, et al. Anterior-posterior ground reaction forces across a range of running speeds in unilateral transfemoral amputees[J/OL]. Sports biomechanics, 2020: 1-12[2022-03-20]. DOI: 10.1080/14763141.2020.1822434.

[28] CAVANAGH P R, LAFORTUNE M A. Ground reaction forces in distance running[J]. Journal of biomechanics, 1980, 13(5): 397-406.

[29] RIDGE S T, JOHNSON A W, MITCHELL U H, et al. Foot bone marrow edema after a 10-wk transition to minimalist running shoes[J]. Medicine & science in sports & exercise, 2013, 45(7): 1363-1368.

[30] BECKER J, JAMES S, WAYNER R, et al. Biomechanical factors associated with Achilles tendinopathy and medial tibial stress syndrome in runners[J]. The American journal of sports medicine, 2017, 45(11): 2614-2621.

[31] MILNER C E, FERBER R, POLLARD C D, et al. Biomechanical factors associated with tibial stress fracture in female runners[J]. Medicine & science in sports & exercise, 2006, 38(2): 323-328.

[32] DEMPSTER J, DUTHEIL F, UGBOLUE U C. The prevalence of lower extremity injuries in running and associated risk factors: A systematic review[J]. Physical activity and health, 2021, 5(1): 133-145.

[33] JOHNSON C D, DAVIS I S. Relationships between arch height flexibility and medial-lateral ground reaction forces in rearfoot and forefoot strike runners[J]. Journal of applied biomechanics, 2021, 37(2): 118-121.

[34] KOWALSKI E, LI Jingxian. Lower limb joint angles and ground reaction forces in forefoot strike and rearfoot strike runners during overground downhill and uphill running[J]. Sports biomechanics, 2016, 15(4): 497-512.

[35] 王俊清,张希妮,罗震,等. 步频再训练对跑步时下肢冲击的生物力学影响研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(5): 2167-2175.
WANG Junqing, ZHANG Xini, LUO Zhen, et al. The influence of cadence retraining on impact forces and lower extremity biomechanics during running[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020, 37(5): 2167-2175(in Chinese).

(编辑 黄崇亚 张璐)